

ACCÉLÉRATION DE PARTICULES À TRÈS HAUTE ÉNERGIE DANS LES SOURCES ASTROPHYSIQUES RELATIVISTES

Directeur de thèse principal : **Martin Lemoine** (Institut d'Astrophysique de Paris)

Co-directeur de thèse : **Laurent Gremillet** (CEA/DAM/DIF)

Candidat pour la thèse : **Édouard Callies**

Contexte – Quelles sont les sources des rayons cosmiques de très haute énergie, au-delà du PeV, voire du EeV ? D'où viennent les neutrinos cosmiques d'énergie TeV – PeV ? Quelle physique est à l'origine des spectres radiatifs produits par les environnements de trous noirs, les blazars, les sursauts gamma et autres sources puissantes, désormais collectés de façon routinière depuis le domaine radio jusqu'aux gammas de haute énergie ? Quel processus donne lieu aux contreparties électromagnétiques des événements d'ondes gravitationnelles ?

Toutes ces questions façonnent l'astrophysique des hautes énergies, l'astroparticule ou le champ émergent de l'astrophysique multi-messagers. Elles sont portées par les avancées expérimentales majeures réalisées ces dernières décennies grâce au développement de détecteurs géants (Auger, Virgo, Antares-KM3NeT, H.E.S.S, EHT etc.). Elles touchent et empruntent à de nombreuses disciplines de la physique et de l'astrophysique moderne. Au cœur de ces questions, on retrouve une même problématique : quel est le processus donnant lieu à l'accélération de particules chargées (électrons, noyaux) dans ces objets ?

Cette problématique fournit le cadre-même de ce projet de thèse, qui vise à faire progresser notre compréhension des mécanismes d'accélération de particules à très haute énergie dans les écoulements turbulents, relativistes et magnétisés des sources astrophysiques puissantes.

Descriptif – La physique de l'accélération de particules dans les plasmas astrophysiques remonte aux travaux pionniers de Enrico Fermi en 1949. On peut décrire dans leurs grandes lignes les principaux mécanismes d'accélération : processus dits de Fermi (accélération autour d'une onde de choc, dans un plasma turbulent, dans un champ de vitesse avec cisaillement etc.), zones de reconnexion ou champs électrostatiques localisés. Le problème est cependant si complexe qu'il reste difficile de tirer des prédictions détaillées et d'un intérêt astrophysique immédiat, par exemple quel sera la forme du spectre en énergie produit, quelle sera l'énergie maximale atteinte, ou dans quelle condition tel ou tel mécanisme pourra opérer.

Cette complexité tient au caractère non-linéaire et multi-échelle de la physique mise en jeu : non-linéaire car l'accélération repose sur l'interaction entre les particules chargées et des champs électromagnétiques, qui sont fortement modifiés par la réaction en retour des particules accélérées ; multi-échelle, car des particules de haute énergie modifient la configuration électromagnétique sur de grandes échelles spatiales, affectant ainsi l'accélération de particules de moindre énergie (moindre libre parcours moyen). Par ailleurs, ces processus prennent effet dans des conditions qui échappent encore à l'astrophysique de laboratoire,

en dépit de progrès majeurs dans ce domaine : ces plasmas sont sans collisions, relativistes, fortement magnétisés, et comprennent souvent des paires électrons-positrons. Enfin, ces mécanismes agissent sur des échelles spatiales si petites par rapport à celle de la source qu'ils ne sont pas directement observables.

L'introduction récente de la technique de simulation numérique « particle-in-cell » (PIC) en astrophysique, connue de longue date dans les communautés de l'interaction laser-plasma et de la physique à haute densité d'énergie, a bouleversé ce domaine car elle fournit un nouvel outil de pointe pour aborder ces questions. Elle offre une modélisation N-corps électromagnétique d'un plasma, qui permet donc de prendre en compte de manière auto-cohérente les interactions entre particules chargées et champs électromagnétiques ; elle est donc idéale pour répondre aux problèmes évoqués plus haut. Cependant, de telles simulations restent coûteuses en temps de calcul, de sorte qu'on ne peut encore simuler que les premiers pas de l'accélération, sur des échelles de temps et d'espace réduites. Pour cette raison, la conduite de telles simulations doit s'accompagner d'une interprétation et d'une modélisation théorique, afin de pouvoir extrapoler les résultats obtenus aux échelles astrophysiques.

La thèse se fera dans cet esprit : elle combinera simulations numériques en calcul haute performance et modélisations analytiques avancées, à l'instar de nos travaux précédents dans ce domaine (voir bibliographie).

Objectif & Méthode – La thèse propose d'étudier la physique de l'accélération de particules dans un environnement turbulent, fortement magnétisé, tel qu'on peut le rencontrer dans les sources puissantes (sursauts gamma, jets de radio - galaxies, nébuleuses de pulsars ou environnements de trous noirs). La densité d'énergie magnétique y est comparable ou supérieure à la densité d'énergie de masse du plasma, de sorte que la vitesse d'Alfvén v_A qui caractérise les mouvements turbulents, approche c .

La simulation d'une telle turbulence par la technique PIC est très récente, voir Zhdankin et al. (PRL 118, 055103, 2017) ou Comisso & Sironi (PRL 121, 255108, 2018) pour les premières études. Ces simulations suscitent un grand intérêt, car elles ont révélé une riche phénoménologie pour ce qui touche à l'accélération de particules : des spectres en loi de puissance et une importante variation spatiale et temporelle de l'efficacité de l'accélération, qui doit se traduire par une forte variabilité spectrale et temporelle du rayonnement émis. Par ailleurs, elles invalident la modélisation analytique (Fokker-Planck) couramment utilisée en astrophysique des hautes énergies, extrapolée de la théorie quasi-linéaire de physique des plasmas, voir Lemoine & Malkov (2019). Ces travaux, et ceux qui les suivent, ouvrent donc un nouveau champ d'étude très prometteur.

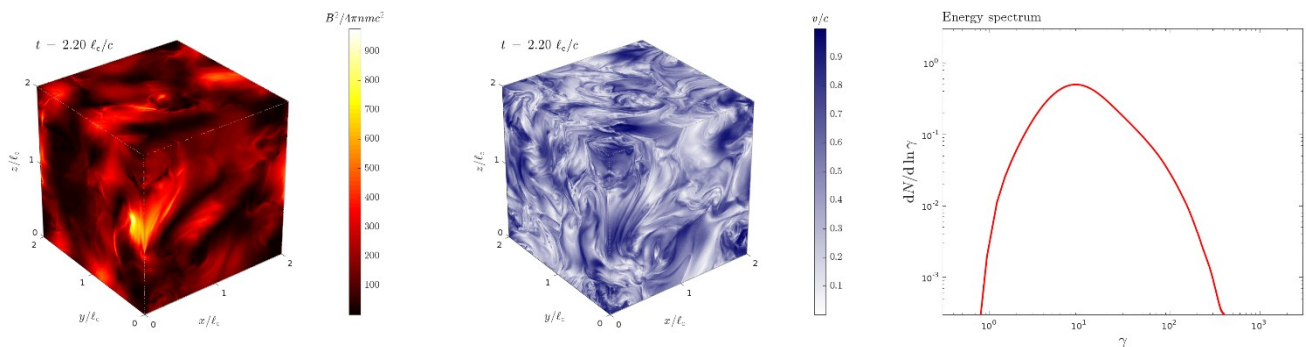


Figure 1: simulation PIC 3D d'une turbulence relativiste magnétisée dans un plasma de paires électrons-positrons. À gauche : densité d'énergie magnétique ; au milieu : champ de vitesse du plasma ; à droite : distribution en énergie des particules du plasma, révélant l'émergence d'une queue suprathermique en loi de puissance. ℓ_c désigne la longueur de cohérence de la turbulence. La vitesse d'Alfvén initiale vaut $v_A \sim 0.7c$, et les fluctuations magnétiques dominent le champ moyen, $\delta B/B \sim 3$. Simulation conduite par V. Bresci, M. Lemoine et L. Gremillet (2022) à l'aide du code CALDER, sur la machine Irene du TGCC.

Nous avons récemment mis au point un module d'excitation de turbulence pour le code PIC CALDER que nous utilisons depuis 2015 pour étudier la physique des ondes de choc relativistes. Cela nous a permis de conduire des simulations 2D et 3D d'une turbulence fortement magnétisée dans un plasma de paires pour étudier la physique de l'accélération, puis de tester (et conforter) un modèle analytique d'accélération non-résonant (Lemoine 2021), voir Fig.1 et Bresci et al. (2022).

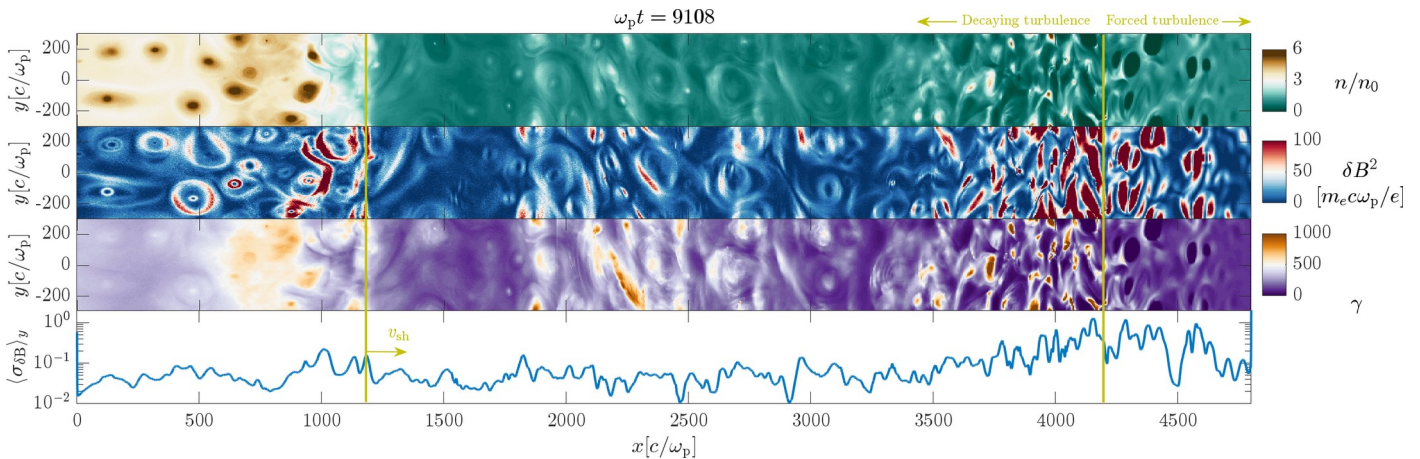


Figure 2 : Simulation PIC 2D de l'interaction entre une onde de choc relativiste et un plasma magnétisé turbulent. La position du choc est indiquée par la ligne verticale orange (vers $x = 1200 c/\omega_p$); celui-ci sépare le plasma non choqué (à droite) du plasma choqué (à gauche), et se déplace vers la droite à vitesse $\sim 0.5c$. Le plasma turbulent, non choqué se déplace vers la gauche à vitesse $\sim 0.9c$, tandis que le plasma choqué est stationnaire dans le référentiel de la simulation. Panneaux, de haut en bas : densité, densité d'énergie magnétique turbulente, densité d'énergie du plasma, et magnétisation effective [$\sigma_{0B} = (v_r/c)^2$]. (c) V. Bresci

Nous avons par ailleurs développé une technique de simulation pour étudier l'interaction entre une onde de choc relativiste et une turbulence préexistante. À notre connaissance, nous sommes le seul groupe à disposer de cet outil pour le régime relativiste. Ce module nous a permis de montrer que les ondes de chocs magnétisées relativistes pouvaient accélérer avec efficacité des particules à haute énergie si le milieu ambiant était turbulent (Bresci, Lemoine, Gremillet 2022).

Enfin, nous incluons d'ici l'été 2022 un module de rayonnement de synchrotron dans le code pour étudier les signatures radiatives de ces scénarios.

Programme de travail - L'objectif principal de la thèse est d'approfondir notre compréhension de l'accélération de particules dans des milieux turbulents à forte magnétisation et d'en extraire des signatures radiatives claires pour comparaison aux observations en astrophysique des hautes énergies. Cette thèse conjuguera des études analytiques poussées et des simulations numériques PIC. Ces simulations permettent de tester les modèles analytiques, tandis que ces derniers visent à extrapoler aux échelles astrophysiques les principes microphysiques extraits de ces simulations. Le programme de travail se décline selon deux axes complémentaires ; le second est particulièrement novateur :

1. Turbulence magnétisée :

Conduire des simulations PIC 3D d'une turbulence magnétisée dans des conditions semblables à celles utilisées précédemment, en utilisant le module synchrotron. Cette étude ne nécessite aucun développement technique de la part de l'étudiant ; elle lui permettra donc de se familiariser avec l'outil de simulation. Il s'agira d'extraire les signatures radiatives d'intérêt astrophysique : spectre, courbe de

lumière (flux vs temps) à différentes fréquences, effets Doppler associés aux mouvements turbulents à grande vitesse, densités spectrales de flux etc. pour différentes magnétisations. Cette étude sera conduite à la fois pour des simulations en plasma de paires électrons-positrons, et en plasma électrons-ions. Dans ce dernier cas, certaines approximations usuelles sont nécessaires pour maintenir le temps de calcul dans une limite raisonnable : en particulier, on considère un rapport de masse proton à électron artificiel, inférieur à 1836 (e.g., 100 ou 400) puis on vérifie l'indépendance des résultats à ce rapport.

2. Turbulence magnétisée dans les jets :

Dans les jets astrophysiques, et dans les environnements de trous noirs (disques d'accrétion), le champ de vitesse présente un cisaillement global par-delà sa nature turbulente, c'est-à-dire une variation de la vitesse moyenne dans la direction transverse au mouvement. Ce cisaillement offre un nouveau mécanisme d'accélération pour les particules dont le libre parcours moyen dans la turbulence est suffisamment important. Ce processus n'a jamais été étudié en simulation PIC. Or, l'outil que nous avons développé lors de la thèse de Virginia Bresci, qui nous permet de mettre une turbulence en mouvement dans un référentiel donné, nous offre l'opportunité de conduire de telles simulations. Celles-ci devraient permettre de répondre à des questions essentielles : quel est le spectre de particules accélérées ? Comment l'accélération dans la turbulence se conjugue-t-elle avec l'accélération dans le champ de cisaillement ? Quelle est l'énergie maximale, et quelles sont les principales signatures radiatives ?

Pour cela, l'étudiant (Édouard Callies) devra modifier le module d'excitation de la turbulence et le module d'injection de particules pour simuler le champ de cisaillement. Ces développements ne posent pas de risque particulier et ils ne devraient pas requérir plus de quelques mois. Puis il conduira les simulations pour une composition de paires électrons-positrons. Ces simulations seront comparées avec la modélisation semi-analytique de ce mécanisme d'accélération que le candidat poursuit actuellement dans le cadre de son stage M2 (supervision : M. Lemoine).

Si le programme de travail avance suffisamment vite, l'étudiant pourra s'intéresser aux aspects complémentaires suivants :

(1) application des résultats à des cas concrets en astrophysique des hautes énergies. On pense en particulier à l'émission prompte des sursauts gamma par dissipation dans une turbulence magnétisée (avec ou sans champ de cisaillement), ainsi qu'au rayonnement synchrotron produit (et observé) sur de grandes échelles spatiales dans les jets astrophysiques par accélération continue dans un champ de cisaillement.

(2) étude des mécanismes d'accélération des électrons dans une turbulence électron - ion. On cherchera en particulier à tester le modèle non-résonant dans la plage non-inertielle de la cascade turbulente. Cette physique riche trouve une connexion directe avec les phénomènes de chauffage des plasmas spatiaux, de même qu'elle joue un rôle central pour expliquer l'émission des disques d'accrétion, par exemple celle observée par le Event Horizon Telescope.

Ce programme de recherche s'appuie sur des simulations numériques conduites sur les supercalculateurs du Très Grand Centre de Calcul (TGCC) du CEA. Notre collaboration obtient chaque année, depuis 2015, un temps de simulation suffisant pour ce faire, environ 7 millions d'heures CPU par an. Nous venons d'obtenir le temps demandé (5 millions d'heures) pour la période mai 2022 - mai 2023.

Adéquation & Encadrement – Ce projet de recherche s'insère parfaitement dans les thématiques de l'IPI, car il émerge aux deux axes majeurs de cette initiative (physique des plasmas et physique de l'Univers et des hautes énergies). Le caractère pluridisciplinaire de ce projet apparaît manifeste. En particulier, les

porteurs sont issus de communautés distinctes : Martin Lemoine (DR1 CNRS) est un astrophysicien théoricien spécialisé dans l'origine des particules de haute énergie dans l'Univers, tandis que Laurent Gremillet (Ingénieur) est un théoricien de la physique cinétique des plasmas, expert en interaction laser-plasma et en simulations numériques PIC. Cela permet aux doctorants encadrés de bénéficier d'une double culture dans ces deux domaines, un atout majeur dans l'astrophysique théorique d'aujourd'hui. Au cours de la thèse, le doctorant développera en outre une double expertise en simulation numérique et modélisation analytique en astrophysique des hautes énergies. Il bénéficiera de l'environnement institutionnel riche qu'offre la région Ile-de-France dans le domaine de la physique des plasmas astrophysiques et de l'astrophysique des hautes énergies, en particulier au travers de la Fédération de Recherche Plas@Par de Sorbonne Université. Enfin, cette thèse s'insère naturellement dans les activités scientifiques de l'IAP. Ce laboratoire est particulièrement impliqué dans la mission satellite SVOM, dédiée à l'observation des sursauts gamma, dont le lancement est prévu pour 2023.

Notre collaboration a permis d'encadrer la thèse d'Arno Vanthieghem (2016 – 2019, post-doctorant à U. Princeton après un séjour de 2 ans à Stanford U.) puis celle de Virginia Bresci (2019 – 2022, bientôt post-doctorante à U. Potsdam). La première thèse a permis d'élaborer un modèle théorique détaillé de la physique des ondes de chocs relativistes, non-collisionnelles et faiblement magnétisées, telle que celles générées par la coalescence d'étoiles à neutrons, donnant lieu à la contrepartie suivie en X. Ces travaux ont fait l'objet de communiqués de presse INSU et CEA. La deuxième thèse (en cours) a permis d'étudier en détail la physique de l'accélération dans l'interaction entre une onde de choc et une turbulence magnétisée, voir plus haut.

Bibliographie des encadrants relative au projet (2018-2022)

- [1] J. Biteau, E. Prandini, L. Costamante, M. Lemoine, P. Padovani, E. Pueschel, E. Resconi, F. Tavecchio, A. Taylor, A. Zech: Progress in unveiling extreme particle acceleration in persistent astrophysical jets, *Nature Astronomy* **4**, 124 (2020).
- [2] V. Bresci, L. Gremillet, M. Lemoine: Saturation of the asymmetric current filamentation instability under conditions relevant to relativistic shock precursors, *Phys. Rev. E*, à paraître, arXiv:2111.04651 (2022).
- [3] V. Bresci, M. Lemoine, L. Gremillet, L. Comisso, L. Sironi, C. Demidem: Non-resonant particle acceleration in strong turbulence: comparison to kinetic and MHD simulations, *Phys. Rev. D*, soumis (2022).
- [4] V. Bresci, M. Lemoine, L. Gremillet: Particle acceleration at magnetized, relativistic turbulent shock fronts, en préparation (2022).
- [5] C. Demidem, M. Lemoine, F. Casse: Particle acceleration in relativistic turbulence: a theoretical appraisal, *Phys. Rev.* **D102**, 023003 (2020). [Editor's choice]
- [6] L. Gremillet, M. Lemoine: Miniature supernovae shock waves, *Nature Physics* **16**, 901 (2020)
- [7] M. Lemoine, L. Gremillet, G. Pelletier, A. Vanthieghem: Physics of Weibel-mediated relativistic collisionless shocks, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 035101 (2019)
- [8] M. Lemoine, A. Vanthieghem, L. Gremillet, G. Pelletier: Physics of relativistic collisionless shocks: II Heating and dynamics of the background plasma, *Phys. Rev.* **E100**, 033209 (2019)
- [9] M. Lemoine, G. Pelletier, A. Vanthieghem, L. Gremillet: Physics of relativistic collisionless shocks: III The supra-thermal particles, *Phys. Rev.* **E100**, 033210 (2019)
- [10] M. Lemoine: Generalized Fermi acceleration, *Phys. Rev.* **D99**, 083006 (2019).
- [11] M. Lemoine, M. Malkov: Powerlaw spectra from stochastic acceleration, *MNRAS* **499**, 4972 (2020).
- [12] M. Lemoine: Particle acceleration in strong MHD turbulence, *Phys. Rev.* **D104**, 063020 (2021).
- [13] G. Pelletier, L. Gremillet, A. Vanthieghem, M. Lemoine: Physics of relativistic collisionless shocks: I The scattering centre frame, *Phys. Rev.* **E100**, 013205 (2019)
- [14] A. Vanthieghem, M. Lemoine, I. Plotnikov, A. Grassi, M. Grech, L. Gremillet, G. Pelletier: Physics and phenomenology of weakly magnetized, relativistic astrophysical shock waves, *Galaxies* **8**, 33 (2020)
- [15] A. Zech, M. Lemoine: Electron-proton co-acceleration on relativistic shocks in extreme-TeV blazars, *A&A* **654**, 96 (2021)